

# 무전극램프의 출력전력 변화에 따른 새로운 모델링 기법

論 文

56-9-18

## New Modeling Method for an Electrodeless Fluorescent Lamp Using the Relation of Lamp Output Power and the Modeling Coefficients of the Lamp.

林秉魯\* · 張牧淳\*\* · 申東碩\* · 朴鐘演†

(Byoung-Noh Lim · Mog-Soon Jang · Dong Seok Sin · Chong-Yeun Park)

**Abstract** - This paper presents a new modeling method using lamp output power and the modeling coefficients of the lamp. The proposed method utilizes the lamp modeling coefficients such as equivalent impedance  $Z(p)$ , coupling coefficient of the transformer  $k(p)$ , turns ratio of the transformer  $n(p)$ , and plasma resistance  $R_p(p)$  as a function of lamp output power. The equivalent impedance  $Z(p)$  was developed from the equivalent resistance  $R_{eq}(p)$  and equivalent inductance  $L_{eq}(p)$  of the lamp.

Simulation and experimental results of the proposed model are presented in order to validate the proposed method. The modeling method can use to design an impedance matching circuit for a Class-D inverter.

**Key Words** : Electrodeless Fluorescent Lamp(EFL), Lamp Modeling, Class-D Inverter

### 1. 서 론

무전극램프(electrodeless fluorescent lamp, EFL)는 기존의 형광램프와 다르게 가스가 봉입된 별브 내부에 전극이 없는 대신 외부에 장치된 페라이트 코어에 의해 고주파 자계가 발생하게 된다. 발생된 고주파 자계는 직각방향의 전자유도전계에 의해 전자 유도형 방전인 H방전으로 변환된다. 변환된 전계에 의해 내부의 가스가 여기 되어 자외선을 발생하게 되며, 램프 내면에 도장된 형광물질에 의해서 가시광선을 발생시킨다.[1]

무전극램프의 일반적인 모델링 방법은 트랜스포머의 결합계수( $k$ ), 턴수 비, 플라즈마저항( $R_p$ )을 구하여 등가모델링을 구한다. 그러나 램프의 출력전력 변화 시에는 트랜스포머의 결합계수( $k$ )값과 플라즈마저항의 값이 변하게 되는 것을 고려해야한다. 또한, 램프의 회사에서는 램프의 모델링을 하기 위한 정보를 극히 일부만 제공하고 있어 램프의 모델링을 하는 것은 매우 어려운 실정이다.

무전극램프의 구동회로는 일반적으로 Class-D 인버터를 사용하며, 램프의 구동을 위해서는 임피던스 정합회로가 필요하게 된다. 정합회로는 LC소자에 의한 공진탱크 구조를 사용하며, 이때 램프의 구동을 위해서는 정확한 모델링에 의한 설계가 필요하게 된다.[2]

본 논문에서는 무전극램프의 출력전력변화에 따른 등가임

피던스를 구하는 방법을 제안하였고, 구해진 등가임피던스로 부터 시뮬레이션 하였으며, 실험에 의해서 본 모델링 기법이 타당함을 증명하였다.

### 2. 무전극램프의 등가화

무전극램프는 정상점등 시에는 전력을 소비하는 저항성분과 페라이트 코어에 의한 인덕턴스 성분으로 등가화 할 수 있다.[3],[4] 이러한 무전극램프의 공급전력에 변화를 줄 경우 램프의 등가저항과 인덕턴스의 성분도 변하게 되며, 무전극램프의 정확한 모델링을 하기 위해서는 등가저항과 인덕턴스 값을 결정하는 결합계수( $k$ ), 플라즈마저항( $R_p$ )의 변화를 고려해야 한다.

#### 2.1 무전극램프의 등가 저항 및 인덕터

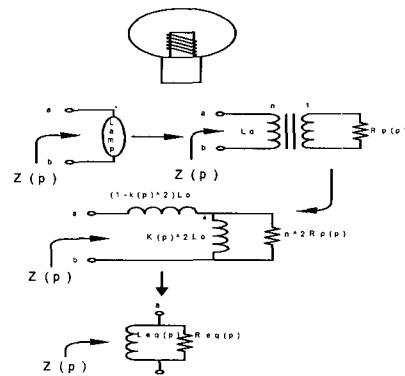


그림 1 무전극램프의 등가모델  
Fig. 1 Equivalent circuit of the EFL

† 교신저자, 正 會 員 : 江原大學 IT특성화대학 敎授·工博  
E-mail : cypark@cc.kangwon.ac.kr

\* 正 會 員 : 江原大學 電氣·電子工學科 碩士課程

\*\* 正 會 員 : 江原大學 電氣工學科 工博

接受日字 : 2007年 5月 16日

最終完了 : 2007年 6月 30日

무전극램프의 모델링은 그림 1과 같으며, 3단계에 걸쳐서 모델링 하였다. 전력변화에 따른 모델링 시 유도코일과 방전관과의 결합계수를  $k(p)$ , 방전관의 플라즈마저항은  $R_p(p)$ , 유도코일의 권선수의 비를  $n:1$ 로 하였다.[5]

그림 1에서 전체 임피던스인  $Z_L(p)$ 은 다음과 같이 표현할 수 있으며,

$$Z_L(p) = R_1(p) + j\omega L_1(p)$$

여기서

$$R_1(p) = \frac{(k(p)n)^2 R_p(p) k(p)^4 \omega^2 L_o}{n^4 R_p(p)^2 + k(p)^4 \omega^2 L_o^2} \quad (1)$$

$$L_1(p) = \frac{n^4 R_p(p)^2 k(p)^2 L_o}{n^4 R_p(p)^2 + k(p)^4 \omega^2 L_o^2} + (1 - k(p)^2) L_o \quad (2)$$

$R_{eq}(p)$ 와  $L_{eq}(p)$ 을 구하기 위해서 변화하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{Z_L(p)} &= \frac{1}{R_{eq}(p)} + \frac{1}{j\omega L_{eq}(p)} \\ &= \frac{1}{R_1(p) + j\omega L_1(p)} \\ R_{eq}(p) &= R_1(p) + \frac{\omega^2 L_1(p)^2}{R_1(p)} \quad L_{eq}(p) = L_1(p) + \frac{R_1(p)^2}{\omega^2 L_1(p)} \end{aligned} \quad (3)$$

식(1), 식(2)의 값을 식(3)에 대입하여 등가화 된 저항과 인덕턴스의 관계식을 구할 수 있다. 그러나 실제 값을 구하기 위해서는  $k(p)$ ,  $R_p(p)$ ,  $n$ 의 값을 구해야 한다. 그러나 램프 제조회사에서는 계수 값을 제공하지 못하기 때문에 램프의 모델링 방법 및 실제 값을 구할 필요가 있다.

### 2.2 Class-D 인버터

본 논문에서는 Class-D 인버터 구조를 사용하였으며, 출력전력 변화를 주기위해서 Buck-Converter를 이용한 DC-Link 전압을 가변하는 방법으로 구성하였으며, 그림 2와 같이 등가 할 수 있다.[2][6] 여기서  $L$ ,  $C_p$ ,  $C_s$ 의 ESR(Equivalent Series Resistance)는 매우 작으므로 무시하였으며, 램프에서 소비되는 전류  $i_L$ 은 입력전류의 기본파 성분만을 고려하였다.

그림 2는 무전극 램프의 모델링 된 회로에 하프브리지 인버터를 적용한 구조이며,  $V_i$ 는 임피던스정합회로에 입력전압을 의미하며, 램프의 소비 전류는 입력 전류의 기본파 성분만 고려하였다.  $i_L$ 에 대한 각주파수의 함수로 구하면, 아래 식(4)과 같이 표현된다.

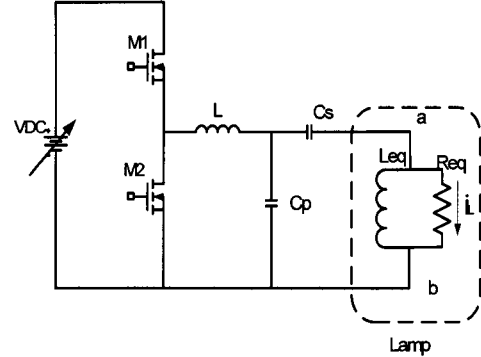


그림 2 Class-D 인버터 구조

Fig. 2 The structure of Class-D inverter

그리고 램프의 소비되는 전력은 식(5)으로 표현된다.

$$P_{Lamp} = |i_L|^2 R_{eq}(p) \quad (5)$$

식(3)은 전력에 관한 함수로 표현되며, 식(5)에 식(4)을 대입하면 출력변화에 대한 램프의 소비 전력을 아래 식(6)과 같이 구할 수 있다.

### 3. 설계 방법

무전극 램프의 모델링을 하기 위해서  $k$ ,  $n$ ,  $R_p$ 의 값을 구해야 하며, 램프제조회사에서는 계수 값을 제공하지 않으므로 램프의 모델링을 하기위해서 다음과 같이 가정을 하였다.[2][5][7]

- (I) 램프의 결합계수는  $0.2 < k < 0.9$
- (II) 램프의 플라즈마 저항값은  $0 < R_p < 10$
- (III) 유도코일의 턴수비는  $0 < n < 10$

Matlab을 이용하여 식(3)으로부터 계수 값을 구하는 시뮬레이션을 실행하다. 그림 3, 4는  $k$ ,  $n$ ,  $R_p$ 값의 가정된 조건에 의해서 시뮬레이션 하였으며, 계수 값의 변화에 따른 무전극램프의 등가임피던스인  $R_{eq}$ ,  $L_{eq}$ 의 값으로 표현된다.

$$i_L(\omega) = \frac{V_i \frac{L_{eq}}{C_p}}{-\omega^2 R L L_{eq} + \frac{L R_{eq}}{C_p} + \frac{L R_{eq}}{C_s} + \frac{R_{eq} L_{eq}}{C_p} - \frac{R_{eq}}{\omega^2 C_p C_s} + j \left( -\frac{\omega L L_{eq}}{C_p} + \frac{\omega L L_{eq}}{C_s} - \frac{L_{eq}}{\omega C_p C_s} \right)} \quad (4)$$

$$P_{Lamp} = \frac{\left( V_i \frac{L_{eq}(p)}{C_p} \right)^2 R_{eq}(p)}{\left( -\omega^2 R L L_{eq}(p) + \frac{L R_{eq}(p)}{C_p} + \frac{L R_{eq}(p)}{C_s} + \frac{R_{eq}(p) L_{eq}(p)}{C_p} - \frac{R_{eq}(p)}{\omega^2 C_p C_s} \right)^2 + \left( \frac{\omega L L_{eq}(p)}{C_p} + \frac{\omega L L_{eq}(p)}{C_s} - \frac{L_{eq}(p)}{\omega C_p C_s} \right)^2} \quad (6)$$

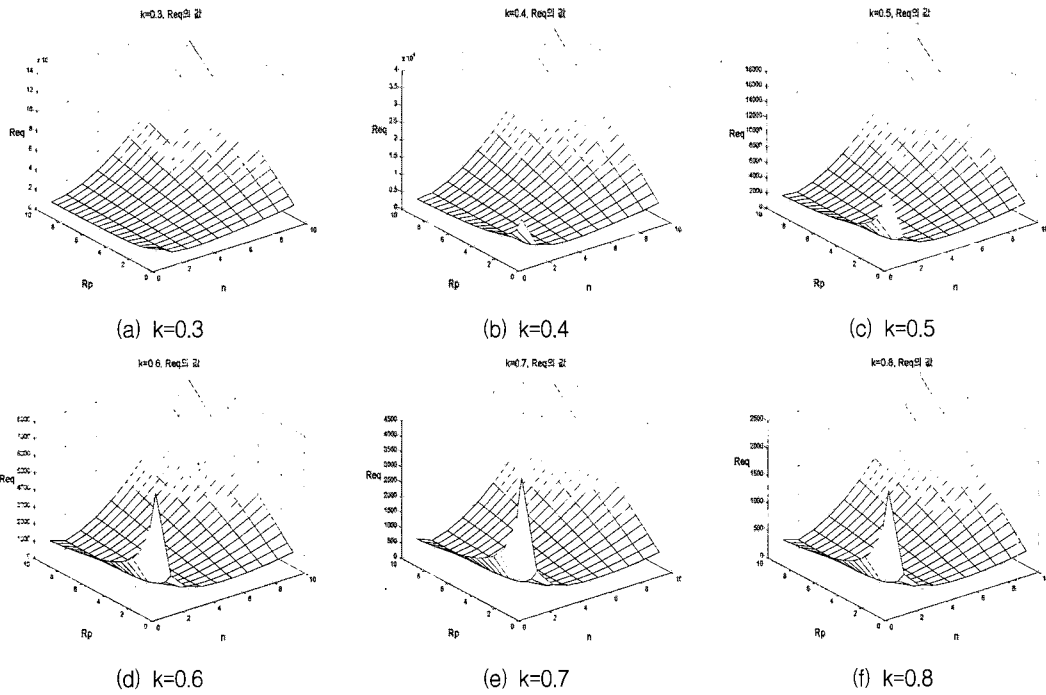


그림 3.  $k$ ,  $R_p$ ,  $n$  값의 변화에 따른  $Req$  값 (a)  $k=0.3$ , (b)  $k=0.4$ , (c)  $k=0.5$ , (d)  $k=0.6$ , (e)  $k=0.7$ , (f)  $k=0.8$  일 때의 시뮬레이션 파형

Fig. 3  $Req$  values according to the variation of  $k$ ,  $n$ ,  $p$  at (a)  $k=0.3$ , (b)  $k=0.4$ , (c)  $k=0.5$ , (d)  $k=0.6$ , (e)  $k=0.7$ , (f)  $k=0.8$

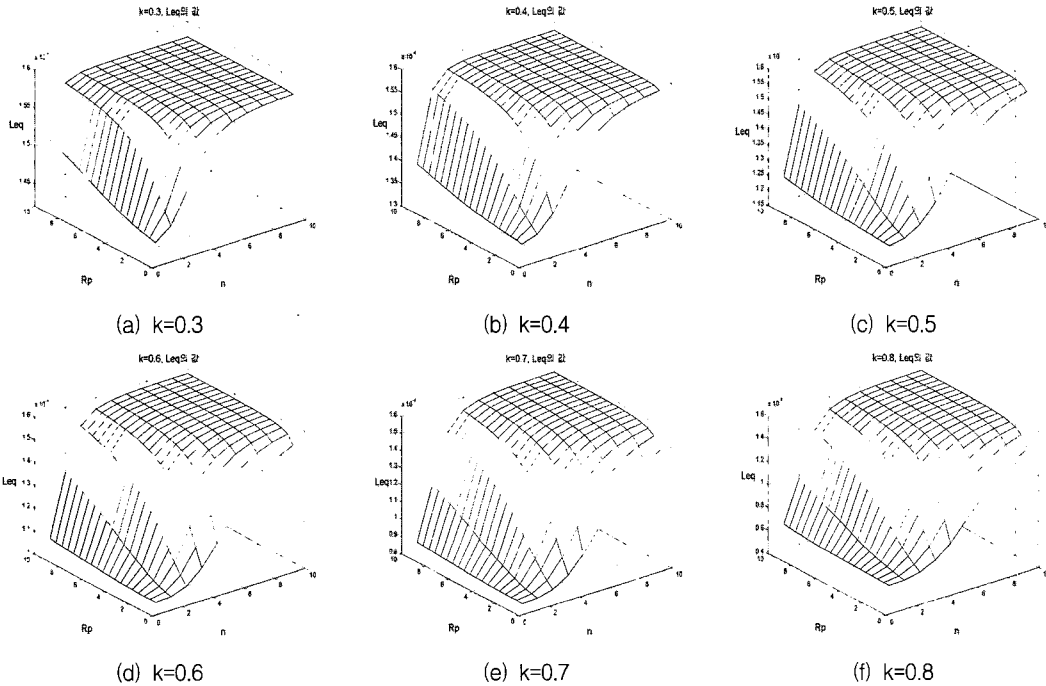


그림 4.  $k$ ,  $R_p$ ,  $n$  값의 변화에 따른  $Leq$  값 (a)  $k=0.3$ , (b)  $k=0.4$ , (c)  $k=0.5$ , (d)  $k=0.6$ , (e)  $k=0.7$ , (f)  $k=0.8$  일 때의 시뮬레이션 파형

Fig. 4.  $Leq$  values according to the variation of  $k$ ,  $n$ ,  $R_p$  at (a)  $k=0.3$ , (b)  $k=0.4$ , (c)  $k=0.5$ , (d)  $k=0.6$ , (e)  $k=0.7$ , (f)  $k=0.8$

정상출력시의 무전극램프에서 소비되는 전력은  $Req$ 에 의해서 소비되며, 제조사에서 제공되는 램프의 소비전력 및

입력전압에 의해서 램프의 등가임피던스회로에  $Req$ 의 값을 구할 수 있다.  $Req$  값에 의해서 그림 3, 4의 시뮬레이션 결

파에서 유도코일의 일차 측 턴 수를 알 수 있으며, 플라즈마 저항값인  $R_p$ 의 범위를 정할 수 있다. 또한, 결합계수  $k$ 의 값을 알 수 있다.

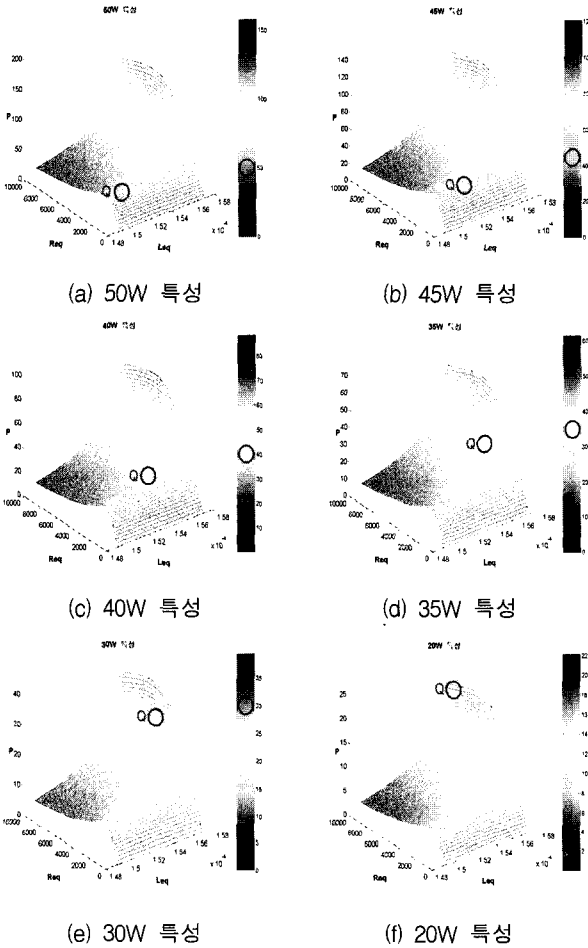


그림 5. 등가임피던스에 의한 출력 특성  
 Fig. 5. The characteristic of lamp power for the variation of equivalent impedance

본 논문에서 적용한 무전극램프는 (주)마쓰시다공공의 'Ever Light 50W'를 그림 1의 방법에 의해서 모델링 하였으며, Class-D 인버터는 그림 2와 같은 구조를 적용하였다. 등가임피던스를 구하는 방법은 식(6)으로부터 구할 수 있으며, 무전극 램프의 출력 변화를 주기 위해서 인버터의 DC\_Link 전압을 가변하는 방법을 사용하였다. 그림 5의 파형은 전력의 변화에 따른  $Req(p)$ ,  $Leq(p)$ 의 관계를 나타내었다. DC\_Link 전압은 400V로 동작을 하게 되며, 무전극램프는 50W로 동작을 하게 된다. 그림 5(a)는 전력에 따른  $Req(p)$ 와  $Leq(p)$ 의 관계를 나타낸 그래프이며, 출력전력에 의한 등가임피던스를 구할 수 있다. 그림 5(b),(c),(d),(e)도 각각 DC\_Link 전압을 가변하여 전력으로 표현하였으며, 전력에 따른  $Req(p)$ ,  $Leq(p)$ 를 구할 수 있다. 즉, 무전극램프의 출력전력변화에 따른 등가임피던스를 구할 수 있다. 결정된  $Req(p)$ 값을 이용하여 그림 3에서  $k(p)$ ,  $R_p(p)$ ,  $n$ 값의 범위를 구할 수 있으며, 그림 4에서는  $k(p)$ ,  $R_p(p)$ ,  $n$ 값의 범위와 결

정된  $Leq$ 값에 의해서  $k(p)$ ,  $R_p(p)$ ,  $n$ 값을 결정할 수 있다.

무전극 램프의 전력변화에 따른 등가저항 및 등가인덕턴스는 전력에 관한 함수로 표현할 수 있으며, 트랜스포머의 결합계수( $k(p)$ ), 플라즈마저항값( $R_p(p)$ )도 전력에 관한 함수로 표현할 수 있다. 그림 6은 전력에 따른 등가임피던스의 값 및 계수 값을 표현하였다.

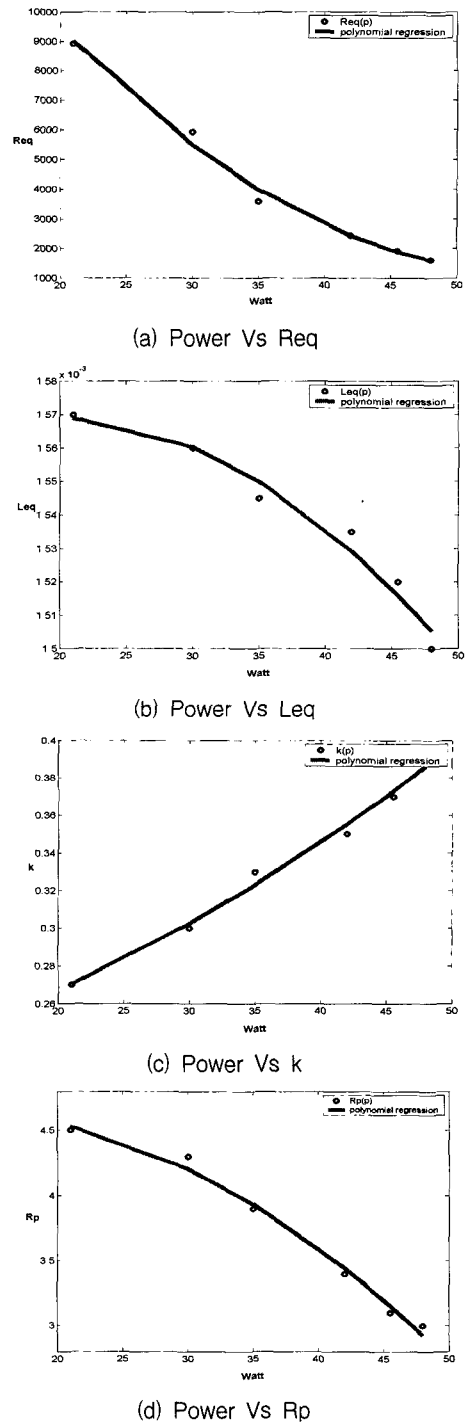


그림 6. 전력에 대한 등가임피던스 및 계수값  
 Fig. 6. The results of equivalent impedance and coefficient for power

표 1. Class-D 인버터의 소자 값

Table 1. The element values of Class-D inverter

	Ever Light 50W
구동 주파수	130kHz
램프의 일차측 인덕턴스( $L_p$ )	160uH
$L$	483uH
$C_s$	0.0185uF
$C_p$	0.022uF

4. 실험 및 검토

시뮬레이션에 의해 구한 등가저항 및 인덕턴스의 값이 타당함을 증명하기 위하여 실험을 통하여 실제 측정된 파형과 비교하였다. 무전극램프의 출력전력을 가변하는 방법으로 Buck-Converter를 제작하여 DC\_Link 전압을 조절하였으며, 그림 7의 (a)는 무전극램프의 출력전력변화에 따른 실제 측정된 파형이며, (b)는 램프의 모델링한 후 시뮬레이션 파형이다.

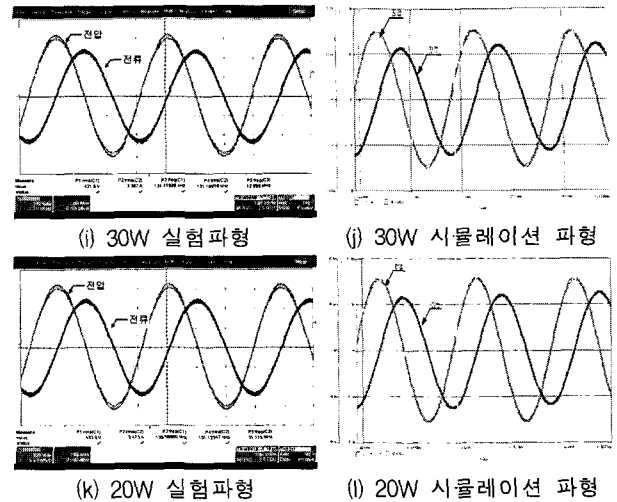
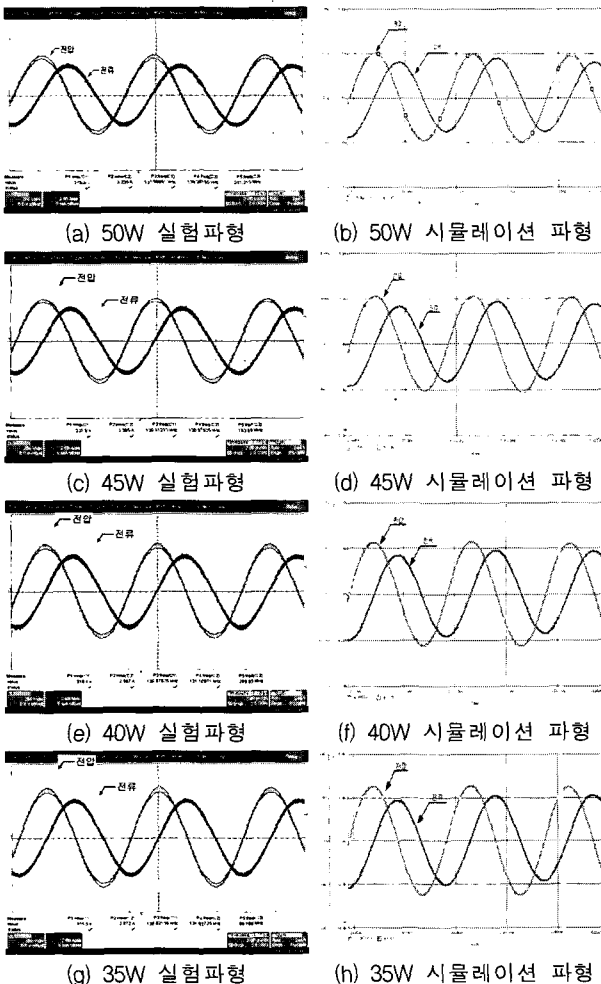


그림 7. 전력변화에 따른 무전극램프 양단의 전압/전류 파형 (실험파형(200V/div,2A/div), 시뮬레이션 파형(400V/div, 4A/div))

Fig. 7. The Voltage and current waveforms of EFL according to the variation of power

실제 측정파형에서 전압과 전류의 위상차는 85°의 위상차가 생기는 것을 확인할 수 있으며, 그 이유는 램프의 등가임피던스에서 등가인덕턴스의 값이 매우 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 그리고 전력이 감소하게 되면 전압 및 전류가 더 많이 공급되는 것을 볼 수 있으며, 그 이유는 그림 6에서의 트랜스포머의 결합계수(k(p)) 및 플라즈마 저항값(R(p))이 변화에 의한 것으로 알 수 있다. 즉, Class-D 인버터에서는 큰 피상전력을 공급하게 되지만 광 출력으로 표현되는 등가저항으로의 소비는 작아지는 것을 의미한다.

본 논문에서는 전력변화에 따른 실제 측정파형과 시뮬레이션의 파형의 값은 표 2에 정리하였으며, 논문에서 제안된 방법에 의해 계수 값 및 등가임피던스를 구하는 방법이 타당함을 증명하였다.

표 2. 시뮬레이션 및 실제측정값

Table 2. Simulation and measured result

측정값 단계	시뮬레이션 값		실제측정 값	
	Vrms	Irms	Vrms	Irms
50W	282V	2.26A	278V	2.38A
30W	424V	3.27A	421V	3.38A
20W	431V	3.45A	433V	3.47A

5. 결론

본 논문은 무전극램프의 출력전력변화에 대한 Req(p), Leq(p)의 함수를 구하였으며, 함수를 통해서 등가임피던스를 구하는 방법을 제안하였다. 또한, 무전극램프를 모델링시 필요한 트랜스포머의 결합계수 k(p) 값과 턴수 비(n) 및 플라즈마저항 Rp(p)값을 전력에 관한 함수로 표현하였으며, 실제 무전극램프의 실험을 통한 측정파형과 시뮬레이션 파형

이 일치함을 확인하였다.

제안된 방법에 의한 무전극램프의 모델링과 계수 값을 구함으로서 출력전력 변화에 따른 Class-D 인버터의 임피던스 정합회로의 설계 시 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

**감사의 글**

본 연구는 올라이프라이프(주)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

**참 고 문 헌**

[1] B. Cook, "New developments and future trends in high efficiency lighting" Journal of Engineering Science and Education, 200, pp. 207-217

[2] Louis Robert Nerone, "Design of a 2.5-Mhz, Soft-Switching, Class-D converter for Electrodeless Lighting", IEEE Transactions on power electronics, vol. 12, No. 3, MAY 1997.

[3] Ben-Yaakov, S. Shvartsas, M., "A Behavioral SPICE Compatible Model of and Electrodeless Fluorescent Lamp", IEEE APEC2002, March, pp. 948-954

[4] Lousi R. Nerone, A. Haq Qureshi, "Mathematical modeling and optimization of the electrodeless, low-pressure, discharge system" in 24th Annu. IEEE Power Elec. Specialist Conf., Univ. Washington, Seattle, 1993, pp. 509-514

[5] Kyu-Min Cho, Won-Seok Oh, Jae-Eul Yeon, Hee-Jun Kim, " A Novel Average Burst-Duty Control Method for the Dimming of Induction Lamps", Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006. SPEEDAM 2006. International Symposium on May, 23rd-26th, 2006. Page(s), 897-902

[6] Miyazaki, H., Shoji, H., Namura, Y., "High-frequency class-D converter driving with feedback capacitors for electrodeless fluorescent lamps", Industry Applications, IEEE Transactions on Volum 36, Issue 4, July-Aug. 2000 Page(s) 1033-1038

[7] Lousi R. Nerone, " A novel ballast for electrodeless fluorescent lamps", Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE, Volum 5, 8-12 Oct. 2000 Page(s), 3330-3337 vol.5

**저 자 소 개**



**임 병 노 (林 秉 魯)**

1978년 11월18일생. 2002년 안양과학대 전기 제어 졸업(전문학사). 2001~2004년 (주)ADG 선임 연구원. 2006년 한림대학교 전자과 졸업(학사). 2006년~현재 강원대학교 대학원 전기전자공학과 석사과정



**장 목 순 (張 牧 淳)**

1966년 10월 25일생. 1992년 강원대학교 전기공학과 졸업(학사). 1994년 동대학원 졸업(석사). 1997년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1998~2005년 University of Toronto, Electric Power Group 선임 연구원. 2006~현재 강원대학교 전기공학과 강사. (주)올라이프라이프 연구소장.



**신 동 석 (申 東 碩)**

1985년 2월 22일생. 2007년 강원대학교 전기전자공학과 졸업. 2007년~현재 강원대학교 대학원 전기전자공학과 석사과정



**박 종 연 (朴 鍾 演)**

1951년 2월 23일생. 1973년 고려대학교 전자공학과 졸업. 1980년 경북대 대학원 졸업(석사). 1984년 동대학원 졸업(박사). 1973~1977년 KIST 연구원. 1977~1984년 울산 공대 조교수, 부교수. 1984년~현재 강원대학교 IT특성화대학 전기전자정보통신공학부 교수.